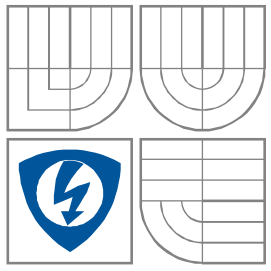
	<p>VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY</p>
	<p>FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS</p>

## ELEKTROMAGNETICKÝ POHON JEDNODUCHÝCH OBJEKTŮ

ELECTROMAGNETIC ACTUATOR OF SIMPLE OBJECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE                      Andrej Kolek  
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE                      Ing. Michal Hadinec , Ph.D.  
SUPERVISOR  
BRNO,2012

## **ABSTRAKT**

Hlavným cieľom tejto práce je zoznámiť sa s princípom pohybu veľmi malých telies pomocou elektromagnetickej sily. V prvej časti sa zoznámime s teóriou elektromagnetizmu a v druhej časti sa zameriame na už fungujúce zariadenie, tzv. coil-gun. Dopodrobna sa v tejto práci nachádza rozobratý návrh, následná konštrukcia a výsledky z merania tohto zariadenia.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

magnetická indukcia, magnetický tok, intenzita magnetického poľa, vlastná a vzájemná indukčnosť, feromagnetické materiály, vírivé prúdy, coil gun, mikrokontrolér ATmega32, assembler, indukčný a Hallovo senzor, Gratzov usmerňovač, PWM regulácia

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to study the principles of the movement of very small bodies using electromagnetic forces. The first part is acquainted with the theory of electromagnetism and the second part will focus on the already functioning device, called coil gun. In detail in this work is disassembled design, construction and subsequent results of the measurement of this device.

## **KEYWORDS**

Magnetic induction, magnetic flux, magnetic field strength, self and mutual inductance, ferromagnetic materials, eddy currents, coil-gun, microcontroller ATmega32, assembler, Induction and Hall sensor, Gratz rectifier, PWM control

# Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Elektromagnetický pohon jednoduchých objektů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 24.5.2012

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Michalovi Hadincovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 24.5.2012

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>ZOZNAM obrázkov</b>	<b>vi</b>
<b>zoznam tabuliek</b>	<b>viii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 teoretické základy</b>	<b>2</b>
1.1 Magnetická indukcia .....	2
1.2 Magnetický tok .....	4
1.3 Intenzita magnetického poľa.....	4
1.4 Magnetické pole a jeho účinky .....	5
1.5 Magnetické pole a elektrický prúd.....	5
1.6 Vlastná a vzájemná indukčnosť .....	6
1.7 Feromagnetické materiály.....	8
1.8 Vírivé prúdy .....	8
<b>2 Princíp coil gunu</b>	<b>10</b>
2.1 Čo je to coil gun.....	10
2.2 Delenie coil gunov .....	11
2.3 Opis činnosti .....	12
2.4 Opis coil gunu .....	13
2.5 Popis konkrétnych častí coil gunu .....	14
2.5.1 Kondenzátorová batéria .....	14
2.5.2 Cievka .....	16
2.5.3 Projektil.....	17
2.5.4 Výkonový spínač .....	18
2.5.5 Zdroj.....	19
2.5.6 Senzory .....	20
2.5.7 Konštrukcia komory, rámu a komponentov .....	21
2.5.8 Prúdový prevodník.....	21
2.5.9 Procesor .....	22
<b>3 Konštrukcia vlastného coil gunu</b>	<b>23</b>

3.1	Napájanie .....	23
3.2	Kondenzatorová batéria .....	23
3.3	Cievka .....	25
3.4	Spínač.....	28
3.5	Hlaveň.....	28
3.6	Projektyly .....	29
3.7	Schematický nákres obvodu .....	30
3.8	POČÍTAČOVÁ SIMULÁCIA .....	31
3.9	VÝSLEDKY MERANÍ .....	32
3.9.1	Východisková pozícia.....	32
3.9.2	Optimálna dĺžka projektilu .....	35
3.9.3	Materiál hlavne .....	36
<b>4</b>	<b>záver</b>	<b>37</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>38</b>
	<b>zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>39</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr.1</i> Magnetické pole v okolí magnetu.....	2
<i>Obr.2</i> Na pravej strane homogénne a na ľavej nehomogénne magnetické pole .....	3
<i>Obr.3</i> Magnetický indukčný tok v závitě .....	4
<i>Obr.4</i> Siločiar v okolí magnetu .....	5
<i>Obr.5</i> Cievka a jej siločiar .....	6
<i>Obr.7</i> Dve cievky a ich vzájomná indukčnosť.....	7
<i>Obr.8</i> Hysterézná krivka látky.....	8
<i>Obr.9</i> Zjednodušený náčrt coil-gunu.....	9
<i>Obr.10</i> Prenosný coil-gun ako pištoľ.....	10
<i>Obr.11</i> Jednocievkový coil-gun .....	11
<i>Obr.12</i> Viaccievkový coil-gun.....	11
<i>Obr.13</i> Základná schéma zapojenia .....	12
<i>Obr.14</i> Použité kondensátory.....	15
<i>Obr.15</i> Podrobný popis cievky.....	16
<i>Obr.16</i> Použité projektily .....	17
<i>Obr.17</i> Tvar projektilu.....	17
<i>Obr.18</i> Výkonový spínač IGBT .....	18
<i>Obr.19</i> Schéma spínaveho zdroju .....	19
<i>Obr.20</i> Schéma senzorov .....	20
<i>Obr.21</i> Usporiadanie komponentov v ráme.....	21
<i>Obr.22</i> Mikrokontrolér ATmega32 .....	22
<i>Obr.23</i> Výkonová dióda.....	23
<i>Obr.24</i> Priebeh napätia na dióde.....	22
<i>Obr.25</i> Kondenzátorová batéria .....	23
<i>Obr.26</i> Simulácia priebehu napätia a prúdu na batérii pri vybití. ....	24
<i>Obr.27</i> Tabuľkový výpočet indukcie cievky v závislosti na kapacite batérie a dĺžke impulzu.....	25
<i>Obr.28</i> Návrh rozmerov cievky podľa jej indukčnosti. ....	26
<i>Obr.29</i> Navinutá cievka upevnená v stojanoch .....	26
<i>Obr.30</i> IGBT tranzistor IGBT P741 .....	27
<i>Obr.31</i> mosadzná a pvc hlaveň .....	27
<i>Obr.32</i> Projektily-ocelový, medený, hliníkový, mosadzný .....	28

<i>Obr.33 schéma obvodu .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr.34 Simulacia.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr.35 Hotový coil gun.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 35: Spôsob výpočtu rýchlosti.....</i>	<i>33</i>

# ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab.1.: Prehľad rýchlostí železného a medeného projektilu v závislosti na polohe v cievke.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab.2.: Prehľad kinetickej energie a rýchlosti nábojov rôznych rozmerov. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tab.3.: Prehľad rýchlostí projektilov rôznych rozmerov vystrelených z pvc a mosadznej hlavne.....</i>	<i>33</i>



# ÚVOD

V tejto práci máme za úlohu zoznámiť sa princípom elektromagnetizmu a jeho vplyvom na malé telesá. Budú tu popísané javy ako magnetická indukcia, magnetický tok, intenzita magnetického poľa, magnetické pole a vírivo prúdy a vlastná a vzájomná indukčnosť. Ako príklad premeny elektromagnetickej sily na silu mechanickú použijeme zariadenia zvané coil-gun alebo ľudovo nazývané elektromagnetické delo, ktoré funguje na rovnakom princípe. Po teoretickom úvode k tomuto zariadení ho zostrojím a urím na ňom niekoľko meraní zameraných k maximalizácii jeho účinnosti.

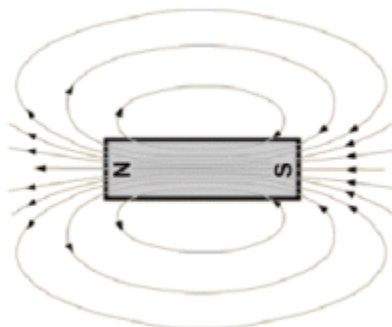
# 1 TEORETICKÉ ZÁKLADY

Pod slovom elektromagnetizmus sa rozumie súbor javov, v ktorom sa prejavuje vzájomná súvislosť poľa elektrického a magnetického. Tieto polia ovplyvňujú častice s elektrickým nábojom a sú nimi a ich pohybom priamo definované. Sila, ktorou elektromagnetické pole pôsobí na častice sa nazýva sila elektromagnetická.[2]

## 1.1 Magnetická indukcia

Magnetická indukcia je vektorová veličina, ktorá vyjadruje silové účinky magnetického pole na častice s nábojom alebo magnetickým dipólovým momentom.

Tvar magnetického poľa môžeme popísať magnetickými indukčnými čiarami. V priestore s magnetickým poľom môžeme zostrojiť krivky, ktorých dotyčnice v každom bode sú rovnobežné s vektorom magnetickej indukcie  $B$ . V grafickom zobrazení sa na krivky nanášajú šípky udávajúce smer magnetickej indukcie  $B$ . Také krivky so šípkami nazývame magnetické indukčné čiary. V miestach s väčšou hustotou magnetických indukčných čiar je veľkosť  $B$  magnetickej indukcie  $B$  vyššia.[3]

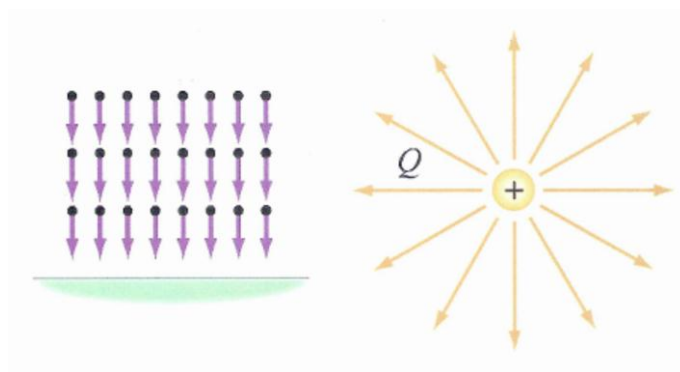


*Obr.1 Magnetické pole v okolí magnetu*

Podľa priestorového rozloženia delíme magneticé pole na:

- Homogenné magnetické pole -je v danej oblasti priestoru také magnetické pole, ktorého magnetická indukcia je vo všetkých bodoch tejto oblasti zhodná veľkosťou i smerom. Dá sa znázorniť priamymi, rovnobežnými, rovnako od seba vzdialenými indukčnými čiarami.

- Nehomogénne-v oblastiach priestoru, kde táto podmienka nie je splnená



Obr.2 Na pravej strane homogénne a na ľavej nehomogénne magnetické pole

Magnetickou indukci si predstavujeme jako sílu, kterou magnetické pole působí na pohybující se elektrický náboj. Velikost magnetické indukce  $B$  v určitém místě magnetického pole je definována ako maximálna sila  $F_{\max}$ , ktorou pôsobí pole na náboj  $Q$ , ktorý sa pohybuje rýchlosťou  $v$ :

$$B = \frac{F_{\max}}{Q_v} \quad (1)$$

Čo sa dá ale v diferenciálnej forme zapísať do tvaru :

$$B = \frac{F_{\max}}{Q_v} = \frac{d \cdot F_{\max}}{I \cdot d \cdot l} \quad (2)$$

Kde  $dl$  predstavuje element dĺžky prúdovej trubice.

Vektor magnetickej indukcie vyjadríme v tvare:

$$B = v \cdot \frac{1}{c^2} \cdot E \quad (3)$$

kde  $v$  je rýchlosť pohybu častice s nábojom,  $E$  intenzita jeho elektrického poľa a  $c$  je rýchlosť svetla.

Veľkosť mag. indukcie cievky (solenoidu) je:

$$B = \mu_0 \frac{N_i}{l} \quad (4)$$

kde  $N$  je počet závitov cievky,  $I$  je prúd prechádzajúci cievkou a  $l$  dĺžka cievky a  $\mu$  je permeabilita, ktorá sa počíta podľa vzorca . Vovnútri cievky je homogénne mag. pole.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (5)$$

kde  $\mu_0$  je permeability vákua a  $\mu_r$  relatívna permeabilita.[3]

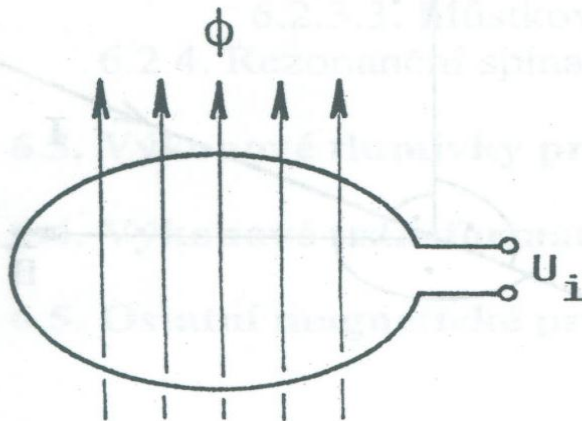
## 1.2 Magnetický tok

Magnetický tok je skalárna veličina definovaná napětím  $u_i$  indukovaným v závite při časové změně toku  $\Phi$  podle vzorce:

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad (6)$$

Magnetickému toku 1 Wb odpovídá indukované napětí 1 V, které vznikne v závite obklopujícím tok při rovnoměrném poklese toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase  $t = 1$  s. Ak je složka  $B$  kolmá k ploše  $S$ , můžeme magnetický indukčný tok definovat podle vztahu[3]:

$$\Phi = BS \quad (7)$$



Obr.3 Magnetický indukčný tok v závite

## 1.3 Intenzita magnetického pole

Je to vektorová veličina definovaná z I.Maxvellovej rovnice, podle které, je ve vzdálenosti  $a$  od přímého velmi dlouhého vodiče s proudem  $I$  intenzita magnetického pole[3]:

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (8)$$

Súvislosť intenzity pola a indukcie je daná vzťahom:

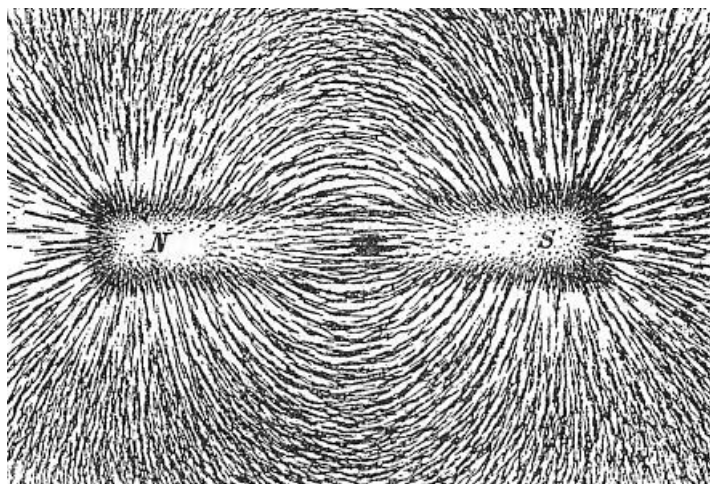
$$B = \mu H \quad (9)$$

Kde veličina  $\mu$  je permeabilita prostredia.

## 1.4 Magneticke pole a jeho účinky

Magnetické pole je charakterizované vektorom intenzity magnetického poľa  $H$  resp. Magnetickou indukciou  $B$ . Priebeh  $H$  v okolo magnetu je zobrazený pomocou siločiar magnetického poľa, čo sú čiary s konštantnou hodnotou  $H$ .

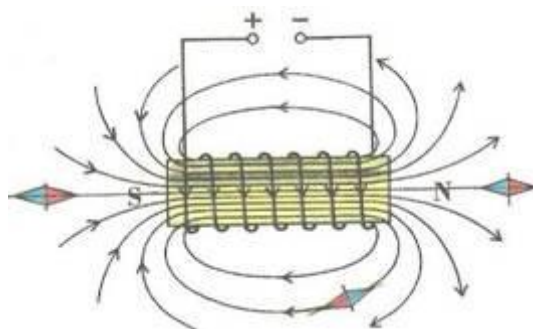
Na základe analógie medzi magnetickým a elektrickým poľom je používaný pojem magnetický náboj. Pomocou neho je definovaný základný útvar magnetický dipól, pričom najmenším dipolovým útvarom je molekula látky.



Obr.4 Siločiary v okolí magnetu

## 1.5 Magneticke pole a elektrický prúd

Podľa skorších objavov vieme, že elektrický prúd je sprevádzaný magnetickým poľom. Typický príklad vidíme na obrázku, kde sú pomocou feromagnetických teliesok zobrazené siločiary magnetického poľa pretekajúce cievkou. Závislosť medzi intenzitou magnetického poľa  $H$  a prúdom cievky  $I$  je popísaná I.Maxvellovou rovnicou.[3]



Obr.5 Cievka a jej siločiry

## 1.6 Vlastná a vzájemná indukčnosť

Indukčnosť alebo vlastná indukčnosť je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje mieru množstva magnetického toku vyvolaného daným elektrickým prúdom. V mojom projekte sa budem zaoberať hlavne indukčnosťou cievky. Je to fyzikálna veličina vyjadrujúca veľkosť magnetického indukčného toku okolo cievky pri jednotkovom elektrickom prúde (1 A) prechádzajúcej cievkou. Popisuje schopnosť cievky zmeniť elektrickú energiu na energiu magnetického poľa. Indukčnosť cievky ovplyvňujú parametre ako materiál, počet závitov, tvar a zloženie jadra cievky.[4]

Statická definícia:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (10)$$

kde  $\Phi$  magnetický indukčný tok,  $I$  je elektrický prúd, ktorý uvedený tok vyvolal.

Dynamická definícia:

$$U_i = -L \frac{dI}{dt} \quad (11)$$

Energia, ktorá bude nahromadená v cievke môže byť popísaná vzťahom:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (12)$$

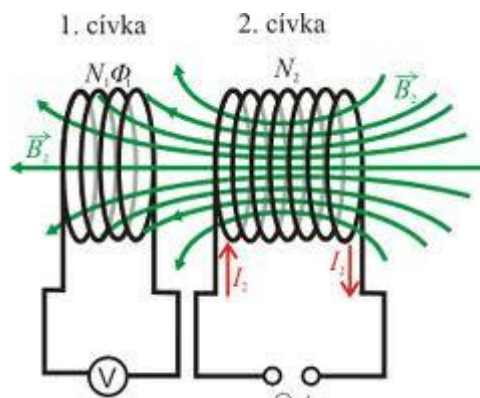
Vlastná indukčnosť cievky:

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S L = \frac{\mu N^2}{l} S \quad (13)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostredia,  $N$  je počet závitov cievky,  $l$  je dĺžka cievky,  $S$  je obsah prierezu cievky (vztah platí pre cievku, ktorej dĺžka je omnoho väčšia než polomer).[4]

Pod pojmom vzájomná indukčnosť si predstavme pôsobenie dvoch cievok vzájomne na seba. Ak sú dve cievky blízko seba a jednou z nich preteká stály prúd  $I_1$ , prechádza druhou z nich magnetický tok. Ak meníme prúd pretekajúci prvou cievkou vzniká v cievke druhej elektromagnetické pole dané faradayovým zákonom. Takže vzájomná indukčnosť udáva mieru väzby medzi dvoma cievkami.

Na obrázku, kde pre jednoduchosť sú dve cievky nakreslené ako dva závity, prvým závitom tečie prúd  $I_1$ , druhým  $I_2$ .



Obr.7 Dve cievky a ich vzájomná indukčnosť

Magnetický tok je definovaný integrálom:

$$\phi = \iint B \cdot dS \quad (14)$$

Pričom vektor magnetického indukcie sa počíta podľa Biotovho-Savartovho zákona. Pre vektor  $B_1$  v okolí prvého vodiča teda platí :

$$B = \int \frac{l \cdot ds \cdot r}{r^3} \quad (15)$$

Spojením dvoch predošlých vzorcov dostaneme pre magnetický tok  $\phi_{21}$  plochou ohraničenou druhým závitom, ale vyvolaným prúdom tečúcim prvým závitom :

$$\phi = l \iint \left[ \int \frac{ds \cdot r}{r^3} \right] = l_1 L_{21} \quad (16)$$

kde  $L_{21}$ , vyjadrený ako plošný integrál, je vzájomná indukčnosť.[2]

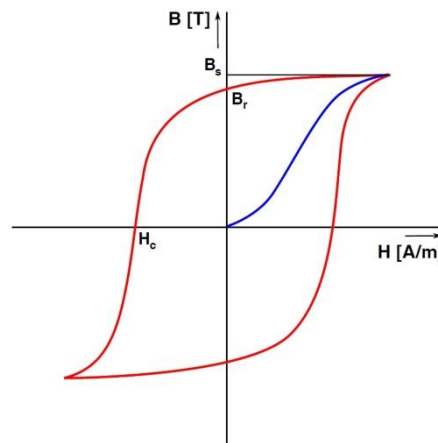
## 1.7 Feromagnetické materiály

Do tejto skupiny patria prevážná väčšina technicky využiteľných magnetických materiálov. Vo feromagnetických látkach je ožné pôsobením aj malého poľa vyvolať silnú magnetizáciu, ktorá úplne nevymizne ani po odstránení vonkajšieho poľa.

Feromagnetické materiály sa rodeľujú do dvoch skupín, magneticky mäkke a magneticky tvrdé. Tieto poznatky využijem pri výbere materiálu pre konštrukciu prijektilu. Najdôležitejším parametrom projektilu bude schopnosť elektromagnetickej vodivosti a schopnosť indukovať vírivé prúdy. Tieto vlastnosti splňajú všetky feromagnetické látky. Nevýhodou väčšiny materiálov je neschopnosť sýtenia až do nekonečna. To znamená, že veľkosť magnetickej indukcie neporastie do maxima daným silou vytvorenou pomocou cievky, ale že sa zastaví na určitej hodnote danou hystereznou slučkou  $B_s$ . [4]

Pomerná permeabilita vybraných feromagnetických látok:

čisté železo	do 6000
trafo plechy	~ 6500
ferit	~ 10 000
železo legované niklom	do 300 000



Obr.8 Hysterézná krivka látky

## 1.8 Vírivé prúdy

Sú to uzavreté elektrické prúdy, ktoré sú indukované zmenou magnetického toku vo vodivých telesách (napr. pohybom v magnetickom poli). Kovové časti sú vlastne vodičom s veľkým prierezom, v ktorom sa indukované prúdy tvoria v plochách kolmých na smer  $\Phi$ . V týchto plochách majú indukované prúdy tvar uzavretých kriviek (odtiaľ názov "vírivé" prúdy). Veľkosť vírivých prúdov je závislá od veľkosti kovového predmetu, merného odporu a rýchlosti zmeny. Ak sú vírivé prúdy vyvolané pohybom



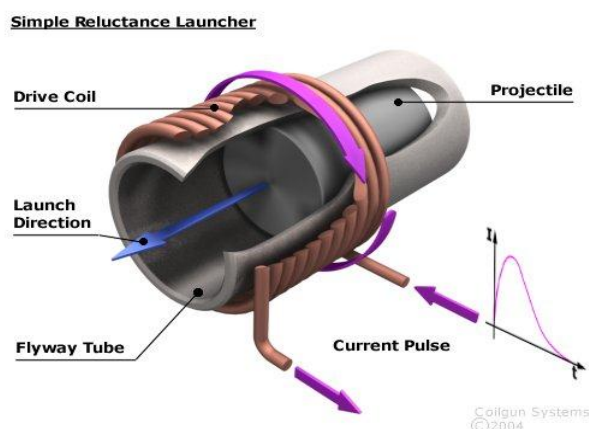
vodiča v magnetickom poli, podľa Lenzovho zákona, tento pohyb brzdia. Vírivé prúdy veľmi rýchlo zanikajú a menia sa na teplo.[2]

## 2 PRINCÍP COIL GUNU

### 2.1 Čo je to coil gun

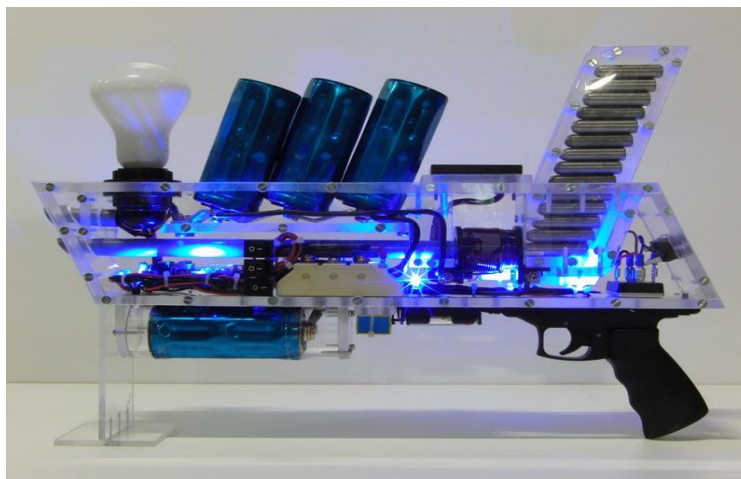
Ako sa už na začiatku spomenulo jedná sa o zariadenie pracujúce na princípe využitia elektromagnetizmu. Zariadenie pracuje v dynamickom režime, pretože spína veľké prúdy na veľmi krátke časy. Elektrický prúd sa premieňa na mechanickú prácu. Toto zariadenie môžeme považovať, že sa chová ako lineárny motor pričom stator tvoria elektromagnety a rotor je tvorený projektílom, ktorý nevykonáva točivý pohyb, ale pohyb sa vykonáva v rovine (urýchľovacej komory). V jednoduchosti sa jedná o obvod, v ktorom je zdroj energie, ktorého energia sa uvoľní do cievky. Najlepšie je použiť ako zdroj kondenzátor, pretože dokáže odovzdať veľké množstvo energie za krátky čas čiže veľký impulzný prúd, ktorý potrebujeme. Čo sa týka elektrotechnického poňatia ide o obvod RLC čiže pozostávajúci z kondenzátora, cievky a spínača, kde sa nesmie zabudnúť na vnútorný odpor

týchto prvkov a taktiež celkovú indukčnosť pri zapojení.[1]



Obr.9 Zjednodušený náčrt coil-gunu

Vývoj coil gunov došiel až tak ďaleko, že sa stavajú prenosné zariadenia vyzerajúce veľmi podobne ako pištoľ. Na týchto coilganoch sú rôzne vychytávky od automatického nabíjania projektílov až po laserové zameriavanie.

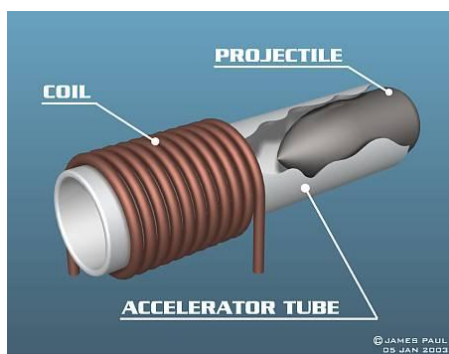


*Obr.10 Prenosný coil-gun ako pištoľ*

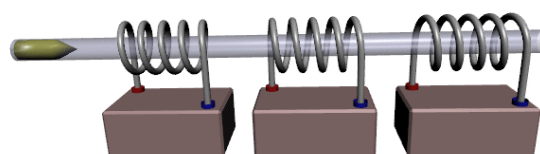
## 2.2 Delenie coil gunov

Coil guny môžeme rozdeliť do dvoch skupín a to podľa počtu cievok, z ktorých sa skladajú.

- Jedno cievkové - pri jednocievkových delách sa nemusíme zaoberať postupným spínaním jednotlivých cievok na základe polohy projektilu (ich výkon sa pohybuje okolo 10%).
- Viac cievkové - použitím viacerých postupne sa spínaných cievok dosahuje delo väčší výkon ako v prípade jednocievkového (výkon až do 50%).[4]



*Obr.11 Jednocievkový coil-gun*



*Obr.12 Viaccievkový coil-gun*

## 2.3 Opis činnosti

Kondenzátor sa nabije na požadované napätie. Potom sa na krátky čas (ms) zopne spínací prvok, a časť energie sa presunie do cievky, kde sa vytvorí silné elektromagnetické pole a to vtiahne magneticky vodivý materiál do vnútra urýchľovacej komory.

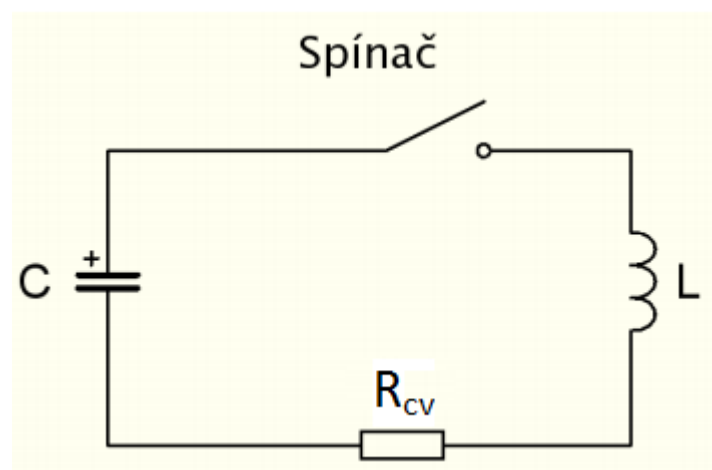
Projektíl je priťahovaný magnetickou silou k stredu cievky, kde je najväčšie pôsobenie sily, ako náhle prejde projektíl do stredu cievky je potrebné ukončiť prúdový impulz, pretože sila pôsobí na projektíl rovnakou silou pozdĺž celej jeho osi Z tohto dôvodu je dôležité správne načasovanie prúdového impulzu. Inak by mohlo nastať spätné brzdenie projektílu prípadné zastavenie. Po tomto prúdovom impulze sa začne energia z cievky vracieť späť do kondenzátora, toto nastáva ak má obvod RLC malé tlmenie nemusí to nastať vždy a začnú kondenzátor nabíjať spätnou polaritou čo napomáha jeho znehodnoteniu a postupnému poškodeniu.

Energia magnetického poľa cievky je priamo úmerná druhej mocnine prúdu v cievke

$$W = 0,5 \cdot L \cdot I^2$$

čiže nezáleží na smere prúdu a preto sila bude vždy priťažlivá pôsobiaca do stredu cievky

Aby bolo zabránené spätnému prebíjaniu kondenzátorov tak v serii sú nainštalované diody s malým odporom paralelne ku kondenzátoru, ktorá utlmí záporný impulz a premení ho tak na teplo. RLC obvod tohto zariadenia je na rozdiel od klasického RLC obvodu s konštantnými parametrami analyticky ťažko riešiteľný až neriešiteľný[4].



Obr.13 Základná schéma zapojenia coil gunu

Keď už má projektíl nejakú rýchlosť, není potreba, aby sa magnetické pole menilo tak rýchlo, pretože k naindukovaniu vírivých prúdov v projektele stačí samotný pohyb projektílu stacionárným magnetickým poľom vytvoreným cievkou.

## 2.4 Opis coil gunu

V nasledujúcej časti sa zameriam na preštudovanie súčasného stavu konštrukcií v oblasti coilgunov, konkrétne trojstupňového urychlovača. Jako už názov naznačuje, jedná sa o trojstupňové zariadenie. Zloženie jednotlivých prvkov je nasledujúce:

### 1. Stupeň

- kapacitná jednotka 4700uF / 400V RIFA EVOX
- spínací prvok IGBT tranzistor 1200V / 600A (T=25 C)

Mitsubishi

Reálne hodnoty sú:

$$U_{\max} = 380 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 550 \text{ A}$$

$$\text{Energia kapacitnej jednotky } W = 339,34 \text{ J}$$

$$\text{Odpor cievky } R = 500 \text{ m } \Omega$$

$$\text{Indukčnosť cievky } L = 325 \text{ uH}$$

$$\text{Výkon impulzu } 228 \text{ kW} / 2 \text{ ms}$$

$$\text{Dĺžka impulzu } T_{\text{impulse}} = 2 \text{ ms}$$

### 2. Stupeň

- kapacitná jednotka 9400uF / 400V RIFA EVOX
- spínací prvok IGBT tranzistor 6x 1200 V/240 A (T=25C) ČKD polovodiče paralelné zapojenie celkovo 1440 A

Reálne hodnoty sú:

$$U_{\max} = 380 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 1320 \text{ A}$$

$$\text{Energia kapacitnej jednotky } W = 678,68 \text{ J}$$

$$\text{Odpor cievky } R = 215 \text{ m } \Omega$$

$$\text{Indukčnosť cievky } L = 100 \text{ uH}$$

$$\text{Výkon impulzu } 532 \text{ kW} / 2 \text{ ms}$$

$$\text{Dĺžka impulzu } T_{\text{impulse}} = 2 \text{ ms}$$

### 3. Stupeň

- kapacitná jednotka 4700uF / 400V RIFA EVOX
- spínací prvok IGBT tranzistor 1200V / 600A (T=25 C)  
Mitsubishi

Reálne hodnoty sú :

$$U_{\max} = 380 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 550 \text{ A}$$

$$\text{Energia kapacitnej jednotky } W = 339,34 \text{ J}$$

$$\text{Odpor cievky } R = 500 \text{ m } \Omega$$

$$\text{Indukčnosť cievky } L = 325 \text{ uH}$$

$$\text{Výkon impulzu } 228 \text{ kW} / 2 \text{ ms}$$

$$\text{Dĺžka impulzu } T_{\text{impulse}} = 2 \text{ ms}$$

Všetky prvky RLC obvodu sú poprepájané vodičmi o priereze  $10 \text{ mm}^2$ . [1]

## 2.5 Popis konkrétnych častí coil gunu

### 2.5.1 Kondenzátorová batéria

Je základným zdrojom energie pre cievky.

#### 1. Stupeň

$$U_{\max} = 400 \text{ V}$$

$$\text{Kapacita} = 4700 \text{ uF}$$

$$\text{ESR} = 8 \text{ m } \Omega \text{ pri } 20 \text{ C}$$

$$\text{Energia kapacitnej jednotky } W = 339,34 \text{ J}$$

$$\text{Prevádzková teplota } T_{\max} = +85 \text{ C}$$

#### 2. Stupeň

$U_{max} = 400 \text{ V}$

Kapacita = 9400  $\mu\text{F}$

ESR = 10 m  $\Omega$  pri 20 C

Energia kapacitnej jednotky  $W = 678,68 \text{ J}$

Prevádzková teplota  $T_{max} = +85 \text{ C}$

### 3. Stupeň

$U_{max} = 400 \text{ V}$

Kapacita = 4700  $\mu\text{F}$

ESR = 8 m  $\Omega$  pri 20 C

Energia kapacitnej jednotky  $W = 339,34 \text{ J}$

Prevádzková teplota  $T_{max} = +85 \text{ C}$

Pri kapacitných jednotkách je veľmi dôležitý vnútorný odpor takzvaný ESR pre danú teplotu . Čím je nižší tým lepšie, pretože na ňom tým pádom vznikajú menšie straty v rámci RLC obvodu sa to týka všetkých prvkov, ktoré majú vnútorný odpor. Kondenzátory, ktoré sú použité v tomto zapojení sú určené na impulznú činnosť jedná sa o elektrolytické

kondenzátory, sú od firmy EVOX RIFA .

Pre ochranu proti záporným špičkám je na

kondenzátory inštalovaná sériová kombinácia diódy a odporu paralelne ku kondenzátoru.[1]



*Obr.14 Použité kondenzátory*

## 2.5.2 Cievka

Je jednou zo základných častí tohto zariadenia. Pri jej navrhovaní bol použitý RLC simulátor. Jednotlivé parametre cievok na jednotlivých stupňoch[1]:

### 1. Stupeň

Odpor cievky  $R = 500 \text{ m}\Omega$

Indukčnosť cievky  $L = 325 \text{ }\mu\text{H}$

Navinuté z vodiča DN2E / 200C 0,7 mm

### 2. Stupeň

Odpor cievky  $R = 215 \text{ m}\Omega$

Indukčnosť cievky  $L = 100 \text{ }\mu\text{H}$

Navinuté z vodiča DN2E / 200C 1 mm

### 3. Stupeň

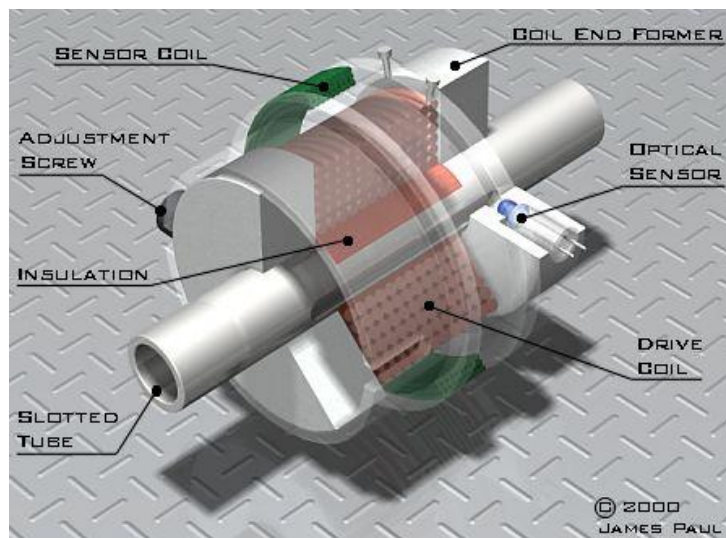
Odpor cievky  $R = 500 \text{ m}\Omega$

Indukčnosť cievky  $L = 325 \text{ }\mu\text{H}$

Navinuté z vodiča DN2E / 200C 0,7 mm

Samotné navýjanie cievky je dosť komplikovaný proces z dôvodu inštalácie senzorov do cievky ako indukčného Halového senzoru a tepelného čidla. Cievky v tomto zariadení sú chladené ventilátormi (každá má vlastný). Je to z dôvodu udržiavania konštantnej teploty aby sa nezmenili a zostali zachované parametre cievky a hlavne jej odporu, ktoré by mohli, ak by sa zmenili, zapríčiniť destabilizáciu celého RLC obvodu, skresli údaje no najmä poškodiť polovodičové prvky. Z toho dôvodu sú takto chladené, a to za pomoci PWM regulácie cez procesor, ktorému podáva aktuálne informácie o stave teploty teplotný senzor DS1820 s rozlíšením 0,5 °C, ideálna teplota cievok je v rozmedzí (23 °C – 27 °C).[1]





*Obr.15 Podrobný popis cievky*

### 2.5.3 Projektil

Najdôležitejšie na projekte je materiál, z ktorého je zostrojený. Dobré je vedieť, že železné jadro zosilní magnetickú indukciu cez ktorú preteká prúd. V tomto prípade bola použitá na konštrukciu magneticky mäkká oceľ. Povrch projektilu bol upravený teflonovým povlakom.

Tvar je aerodynamický a jeho dĺžka je minimálne taká ako je dĺžka cievky.[1]



*Obr.16 Použité projektily*



*Obr.17 Tvar projektilu*

## 2.5.4 Výkonový spínač

Aby sa dostala energia z kondenzátorov do cievky je za potreby okrem vodičov aj spínací prvok v tomto prípade IGBT tranzistor. IGBT je hybrid medzi unipolárnym a bipolárnym tranzistorom. Výkonová časť týchto tranzistorov je tvorená bipolárnou časťou pre nízky odpor  $R_{ce}$ . Riadiaca časť je tvorená unipolárnou štruktúrou čiže je to ako pri mosfet tranzistore veľký vstupný odpor.

Problém nasáva pri plnom otvorení tranzistoru, keď sa hradlo chová ako kondenzátor a na jeho vybudenie treba do neho dostať prúdový impulz dostatočne veľký aby dokázal úplne otvoriť tranzistor. V našom prípade používame na to driver, ktorý dokáže poskytnúť požadovaný impulz do gatu a otvoriť ho a to tak, že driver má pri sebe kondenzátor približne 1000 uF /25 V a túto energiu presunie do gatu, ktorého hodnota je 60 nF, čo je pomerne veľa s porovnaním s ostatnými komerčnými tranzistormi na vybudenie takéhoto hradla treba pomerne veľký špičkový prúd niekoľko ampérov. IGBT moduly, ktoré sú použité v tejto konštrukcii najviac vyhovujú požiadavkam zariadenia. Sú upevnené na chladiče s teplovodnou pastou a ochladzované ventilátorom, k chladičom sú pripojené teplotné senzory na monitorovanie teploty ktoré zabezpečujú aby neplota neprekročila hodnotu 25°C. Chladenie je navrhnuté tak aby mohlo fungovať v špičkovom režime 550 A (600 A), 1320A (1400A) bez straty výkonu alebo aby došlo k poruche. Na hradlo je privádzané napätie 18V čo stačí na jeho úplne otvorenie.

IGBT moduly sú použité od výrobcov Mitshubishi a ČKD polovodiče.[1]

### 1. Stupeň

$$U_{\max} = 1200 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 600\text{A pri } (T=25 \text{ C})$$

$$\text{Prevádzková teplota } T_{\max} = +125 \text{ C}$$

$$\text{Kapacita hradla } C_g = 60 \text{ nF}$$

Mitshubishi

Počet kusov: 1ks

### 2. Stupeň

$$U_{\max} = 1200 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 240\text{A pri } (T=25 \text{ C})$$

$$\text{Prevádzková teplota } T_{\max} = +125 \text{ C}$$

$$\text{Kapacita hradla } C_g = 8 \text{ nF}$$

ČKD

Počet kusov: 6ks

### 3. Stupeň

$$U_{\max} = 1200 \text{ V}$$

$$I_{\text{peak}} = 600 \text{ A pri } (T=25 \text{ C})$$

$$\text{Prevádzková teplota } T_{\max} = +125 \text{ C}$$

$$\text{Kapacita hradla } C_g = 60 \text{ nF}$$

Mitshubishi

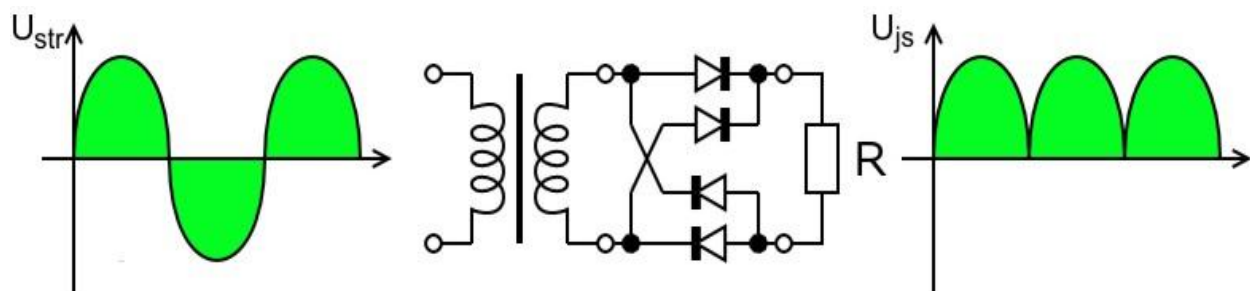
Počet kusov: 1[1]



Obr.18 Výkonový spínač IGBT

## 2.5.5 Zdroj

Zariadenie je napájané napätím  $\sim 230 \text{ V}$ , ktoré je následne usmernené pomocou usmerňovacieho zdroju a vyfiltrované na napätie  $325 \text{ V}$ . Týmto napätím sa nabíjajú kondenzátory cez ochranné odpory a zároveň cez tieto odpory sa aj vybíjajú. Usmernenie je riešené technológiou Gratezovho usmerňovača.[1]



Obr.19 Schéma spínaveho zdroju

## 2.5.6 Senzory

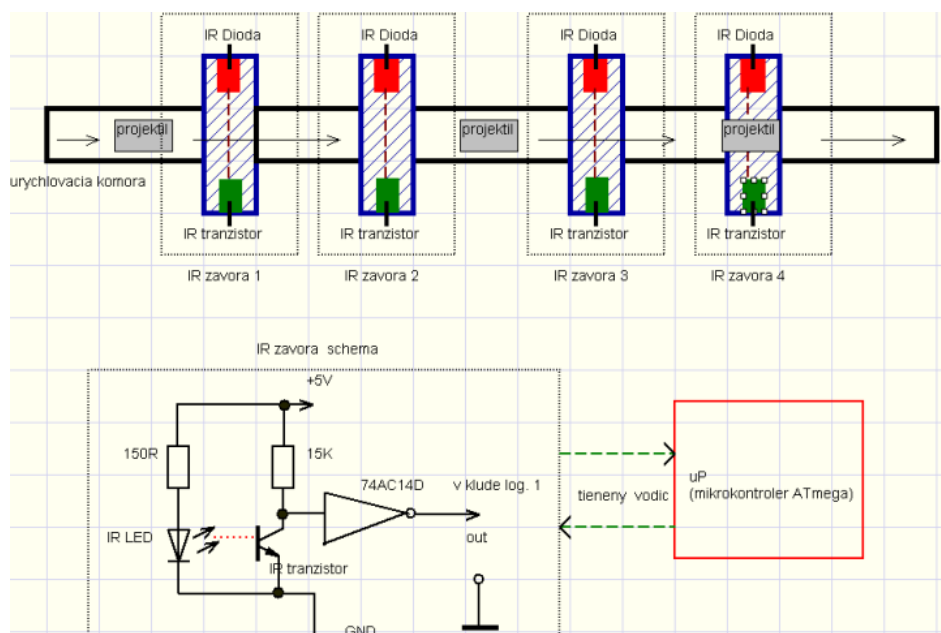
Na tomto zariadení sa nachádza niekoľko senzorov, ktoré zabezpečujú jeho správne fungovanie. Nachádza sa tu optický, tepelný, indukčný a Hallov senzor.

Optický senzor je veľmi dôležitý, slúži na výpočet rýchlosti projektilu, na zistenie jeho polohy v komore a s tým spojené správne načasovanie celého systému. Sensory sú štyri a fungujú na princípe IR vysielачa a IR prijímača reagujúci na lúč vysielaný z vysielачa.

Signál smeruje do procesoru.

Teplotný senzor zabezpečuje celkovú teplotnú stálosť cievok a polovodičov. Bol použitý konkrétne typ DS, ktorého tepelná presnosť je 0,5 C. Signál z neho je vedený na spracovanie priamo do mikrokontroléru, kde je spracovaný a vyhodnotený.

Dvojica indukčný a Hallov senzor poskytujú informácie o polohe projektilu a o veľkosti magnetického poľa. Informácie sa spracúvajú v procesore, ale ešte predtým sú prevedené z analógovej formy do digitálnej pomocou A/D prevodníka.[1]



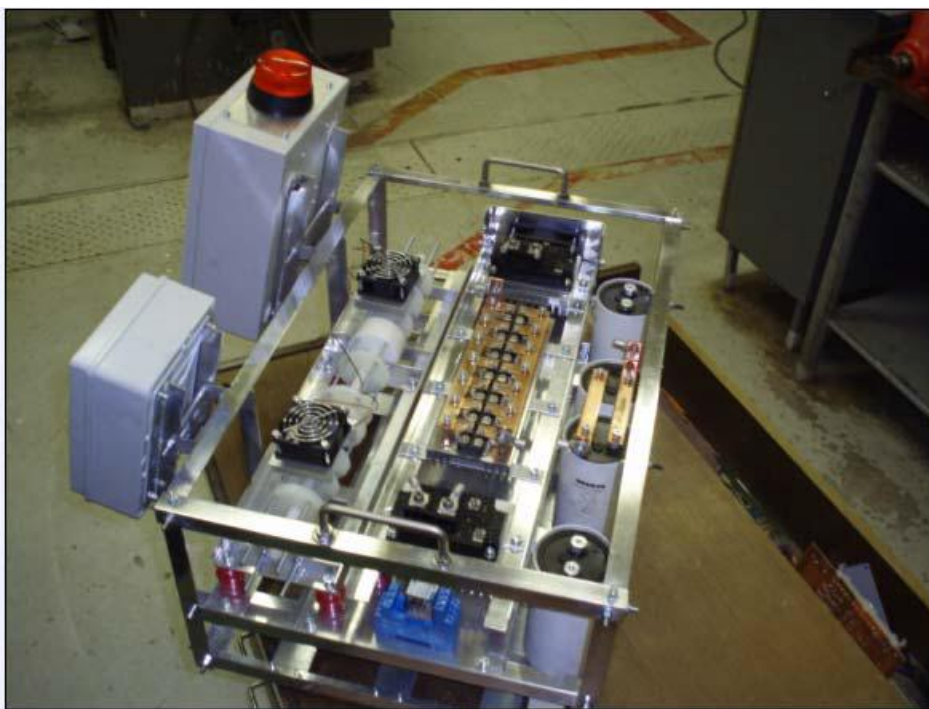
Obr.20 Schéma senzorov

### 2.5.7 Konštrukcia komory, rámu a komponentov

Komora je priestor, na ktorej sú uložené cievky a aj miesto, kadiaľ je projektil urýchlňovaný. Obrazne by sa dalo povedať, že tvorí hlavu delu. Je skonštruovaná z teflonu z dôvodu vírivých prúdov. Keďže teflon je materiál tzv. magneticky mäkký nebudú sa v jeho okolí indukovať vírivé prúdy. Je to termoplast, ktorý je schopný pracovať v teplote až 250 °C a má nízky súčiniteľ trenia čo je ďalšou výhodou tohto materiálu. Samotná komora má dĺžku

500 mm, vonkajší priemer je 5 mm a vnútorný 4 mm. Na špeciálnych silikónových prstencoch sú umiestnené optické senzory, ktoré sú zafixované pomocou závitových tyčí.

Celé zariadenie je vložené do hliníkového rámu o rozmeroch 600 mm x 400 mm x 25 mm, jedine vykonáva a riadiaca časť zariadenia sú uložené mimo. IGBT tranzistory sú umiestnené na chladičoch a tie následne na hliníkový rám. Kondenzátorová batéria sa nachádza na hliníkovej lište a ostatné časti na izolačných podložkách. [1]



*Obr.21 Usporiadanie komponentov v ráme*

### 2.5.8 Prúdový prevodník

Pre správnu funkciu zariadenia bolo potrebné merať veľkosť prúdových impulzov. To zabezpečuje bočník, ktorom pomocou odporu môžeme zmerať napätie. Zjednodušene ide o meranie úbytku napätia. Toto napätie je následne posielané do 10 bitového prevodníka a odtiaľ do mikrokontroléra.[1]

### 2.5.9 Procesor

Ovládanie zariadenia zabezpečuje mikrokontrolér ATmega32, ktorý riadi správne načasovanie IGBT modulov, nabíjanie a vybíjanie kondenzátorovej batérie a taktiež komunikuje so senzormi. Získané údaje zo senzorov sú cez seriovú linku zasielané do počítača, kde sa graficky spracúvajú a zaznamenávajú. Okrem riadenia cez počítač sad a zariadenie ovládať aj pomocou riadiaceho panelu uchytenom na ráme konštrukcie.

Pri programovaní mikrokontroléra bol použitý jazyk C a tiež assembler a jazyk PHYTON.[1]



*Obr.22 Mikrokontrolér ATmega32*

### 3 KONŠTRUKCIA VLASTNÉHO COIL GUNU

#### 3.1 Napájanie

Magnetické delo je napájané zo siete 230 V striedavo. Následne je toto striedavé napätie pomocou diódy menené na jednosmerne:

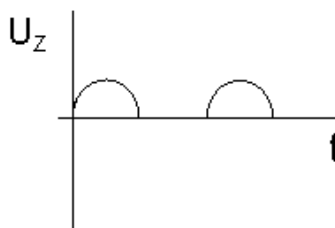
$$U_c = 230 \cdot \sqrt{2} = 325V$$

Z tejto hodnoty vypočítame špičkový prúd, ktorý budem mať na vrchole impulzu hodnotu:

$$I_p = U \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = 325 \cdot \sqrt{\frac{1,09}{1,36}} = 294,9A$$



Obr.23 Výkonová dióda



Obr.24 Priebeh napätia na dióde

#### 3.2 Kondenzátorová batéria

Skladá sa z dvoch kondenzátorov o kapacite 680uF a jej celková kapacita bude 1,36mF.

$$C = 680uF + 680uF = 1,36mF$$

Pomocou tejto kapacity dokážeme dostať z batérie energiu o hodnote 71,8J.

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot 325^2 = 71,8J$$

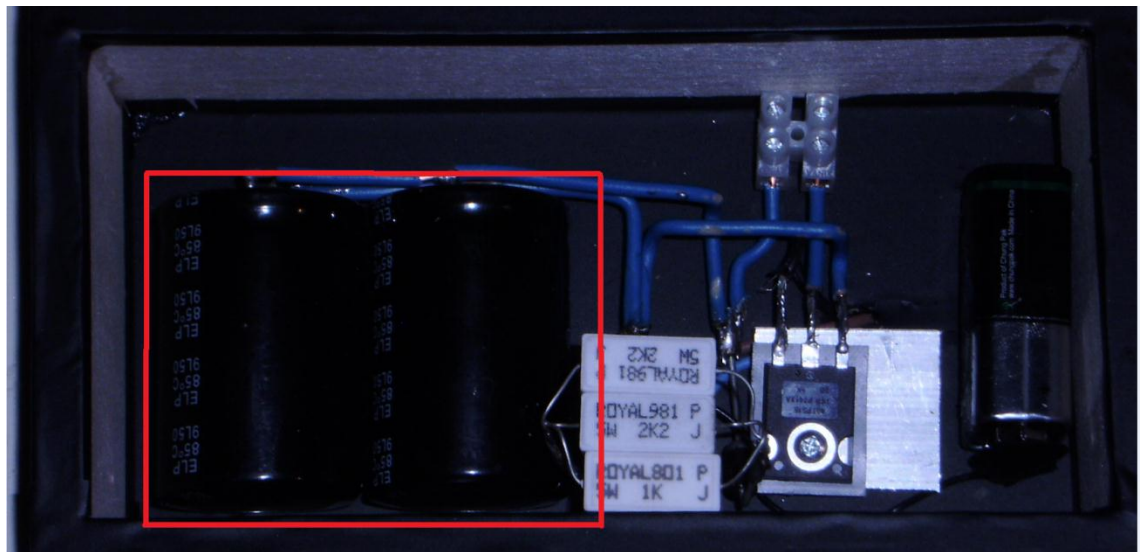
Čas potrebný na vybitie batérie vyšiel 4,2 ms. Tento výpočet som overoval aj pomocou simulácie, z ktorej vyšla hodnota 3,68 ms, takže sa výpočet potvrdil. Preto je pre moje účely vhodnejší kondenzátor, ktorý sa vybije rýchlo, hoci má menšiu kapacitu ako kondenzátor ktorý ma veľkú kapacitu, ale pomalé vybíjanie.



$$t = -R_l \cdot C \cdot \ln \cdot \frac{U_{tyr}}{U_c} = 4,2\text{ms}$$

Pri kapacitných jednotkách je veľmi dôležitý vnútorný odpor takzvaný ESR pre danú teplotu . Čím je nižší tým lepšie, pretože na ňom tým pádom vznikajú menšie straty v rámci RLC obvodu sa to týka všetkých prvkov, ktoré majú vnútorný odpor.

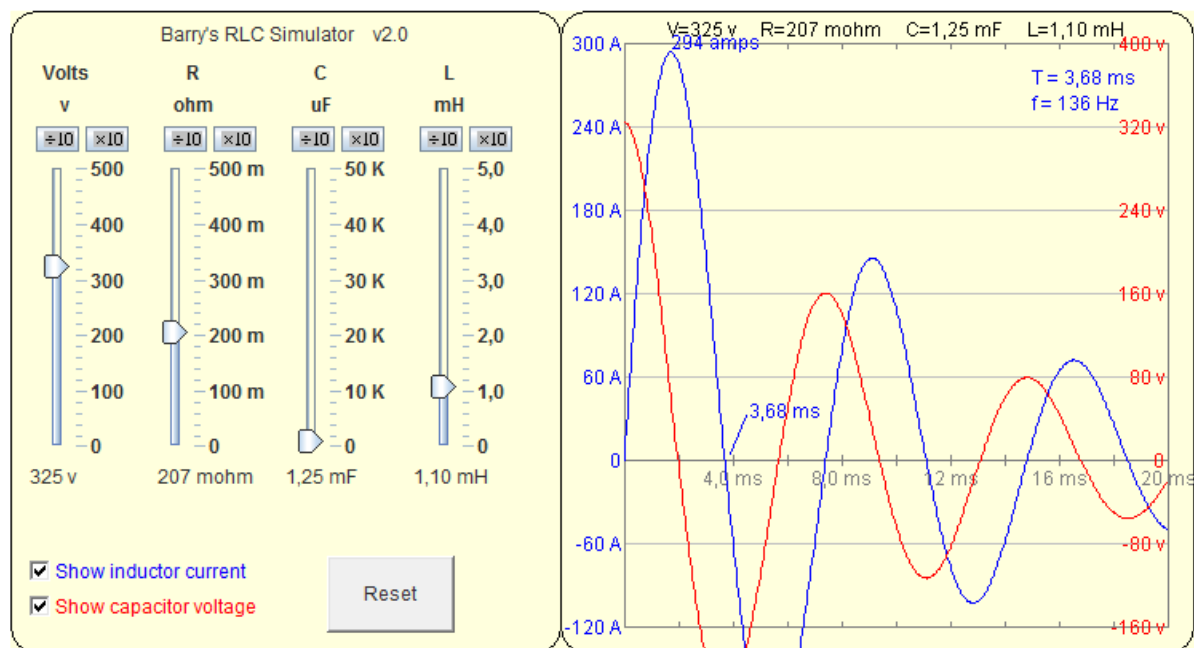
Kondenzátory, ktoré sú použité v tomto zapojení sú elektrolytické a vyrobila ich firma Hitano.



*Obr.25 Kondenzátorová batéria*

Ako ochranu pred záporným prúdovým špičkám je použitá sériová kombinácia diódy a odporu, paralelne ku kondenzátorovej batérii.





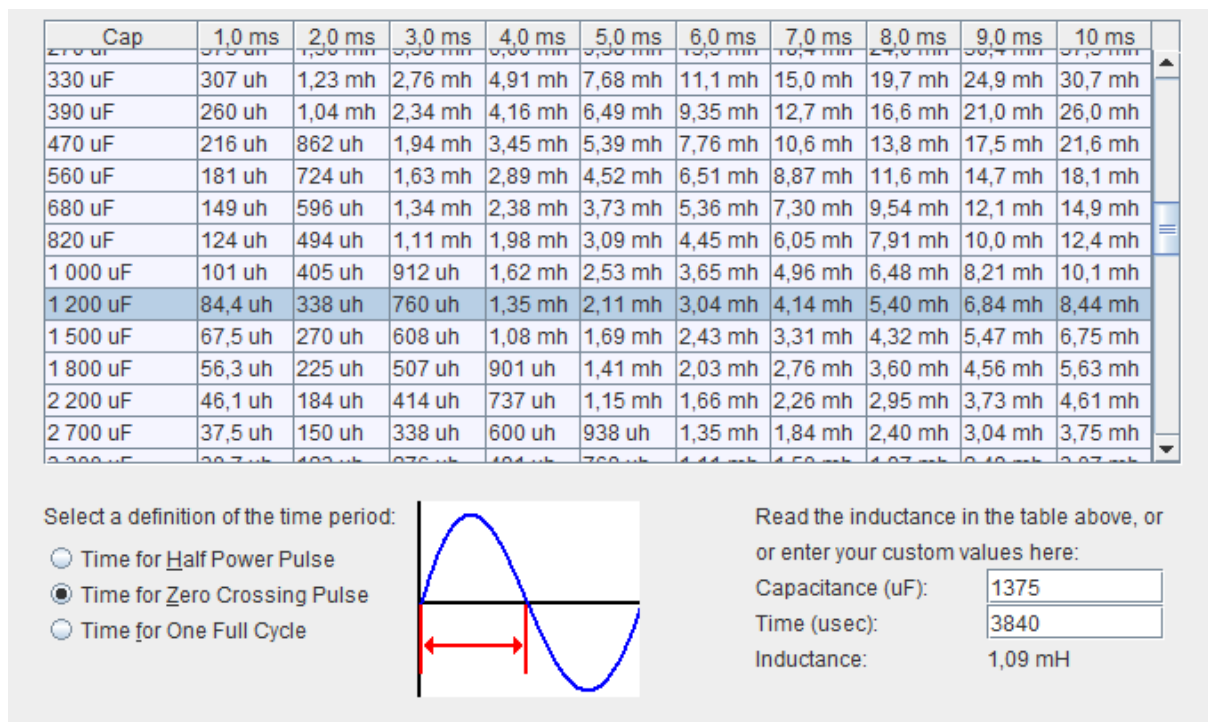
Obr.26 Simulácia priebehu napätia a prúdu na batérii pri vybití[5].

### 3.3 Cievka

Pri návrhu cievky som použil online RLC simulátor. Čas za ktorý opustí projektíl cievku je cca 4ms z čoho vyplýva, že potrebujem kondenzátorovú batériu ktorá sa vybije za 4ms. Energia, ktorá sa dostane z kondenzátorov po tejto dobe je pre mňa neúčinná pretože projektíl bude už mimo cievky a nebude naň pôsobiť.

Podľa kapacity kondenzátorovej batérie 1,36 mF a doby trvania polovice periódy 3,68 ms mi vyšla optimálna hodnota indukčnosti cievky zo simulácie na hodnote 1,10mH . Hodnota vypočítanej indukčnosti cievky zo vzorca je 1,07 mH, čo len potvrdzuje správnosť simulácie.

$$L = \frac{u \cdot N^2}{l} \cdot S = 1,07 \text{ mH}$$



Obr.27 Tabuľkový výpočet indukcie cievky v závislosti na kapacite batérie a dĺžke impulzu[5].

**Parametre cievky** pre indukčnosť 1,1 mH a priemer 0,77 mm medeného drôtu sú nasledovné:

dĺžka: 110 mm  
 priemer: 20 mm  
 počet závitov: 896  
 počet vrstiev : 7

Teoreticky odpor ma hodnotu 1,3 ohm , čo sa dosť líši od zmeranej hodnoty 1,717 ohm. Táto odchylka bola spôsobená menšími nepresnosťami pri navíjaní alebo kvalitou medeného drôtu.

$$R_i = \zeta \frac{l}{S} = 1,3 ohm$$

**Air Core Inductor** v1.9

Next Wire      Inner Diam. 7 mm      Outer Diam. 20 mm

1.32 mm  
 1.25 mm  
 1.20 mm  
 1.18 mm  
 1.12 mm  
 1.10 mm  
 1.06 mm  
 1.00 mm  
 0.95 mm  
 0.90 mm  
 0.80 mm  
 0.70 mm  
 0.60 mm  
 0.50 mm  
 0.40 mm  
 0.31 mm  
 0.22 mm

Length = 110 mm

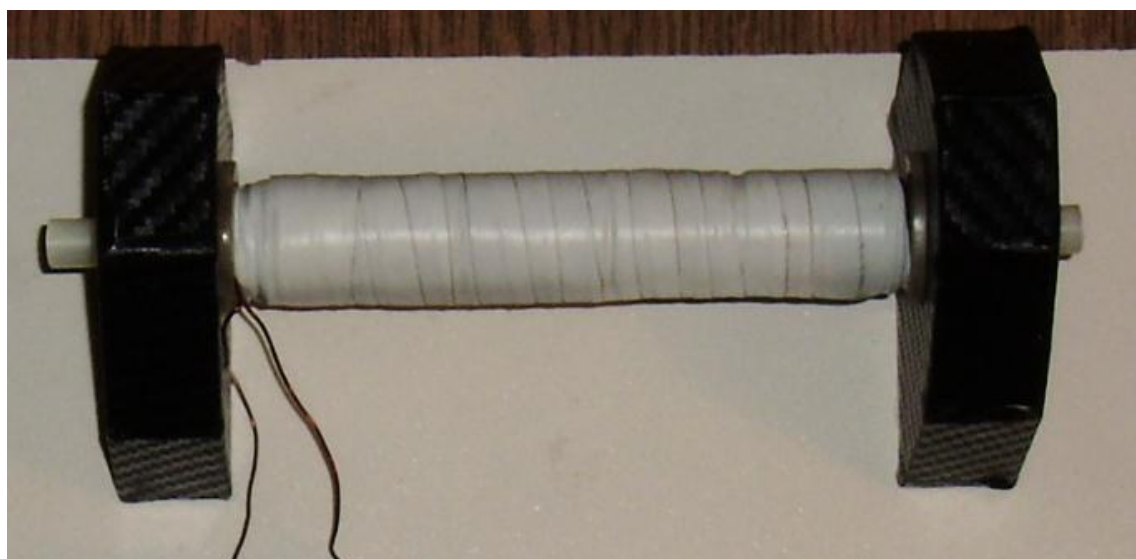
Maximum diameter:  
☒ 100 mm  
☐ 500 mm

Number of turns =	<b>896 turns</b>	Inductance =	<b>1,052 mH</b>
Winding density =	11,7 turns/cm	Resistance =	1,303 ohms
Turns per layer =	128 turns	Wire length =	38,00 m
Number of layers =	7 layers	Wire weight =	0,17 kg
Wire diameter =	0,86 mm		

Obr.28 Návrh rozmerov cievky podľa jej indukčnosti[5].

Energia, ktorú teoreticky môžeme z cievky dostať je 46,6 J.

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 = 46,6 J$$



Obr.29 Navinutá cievka upevnená v stojanoch

### 3.4 Spínač

Aby sa dostala energia z kondenzátorovej batérie do cievky, je potrebné okrem vodičov aj spínací prvok, v tomto prípade IGBT tranzistor. IGBT je hybrid medzi unipolárnym a bipolárnym tranzistorom. Jeho výkonová časť je tvorená bipolárnou časťou pre nízky odpor  $R_{ce}$ . Riadiaca časť je tvorená unipolárnou štruktúrou takže má veľký vstupný odpor.

Treba mať na pamäti, že v spínacom režime sa hradlo chová ako kondenzátor, a na jeho plné otvorenie je treba do neho dostať prúdový impulz. V mojom prípade budem používať obyčajnú 9 V batériu



*Obr.30 IGBT tranzistor IGBT P741*

### 3.5 Hlaveň

Cievka je navinutá na rúrke o priemere 7mm. Na vyber som mal z materiálov karbón, pvc a mosadz. Pri meraniach zistím, ktorý z týchto materiálov je najvhodnejší pre moje použitie. Podľa niektorých teórií by indukcia vírivých prúdov mohla zväčšiť účinnosť a projektíl by mohol dosiahnuť vyššiu rýchlosť pri materiáloch, ktoré sú vodivé- karbón, mosadz. Teóriu overím meraním.



*Obr.31 mosadzná a pvc hlaveň*

### 3.6 Projektily

Ako náboje na strieľanie som použil klince. Tie sa od seba líšili či už rozmermi, alebo materiálom z ktorého boli vyrobené. Použil som náboje z ocele, mede a mosadze veľkosti od 12,8-13cm.

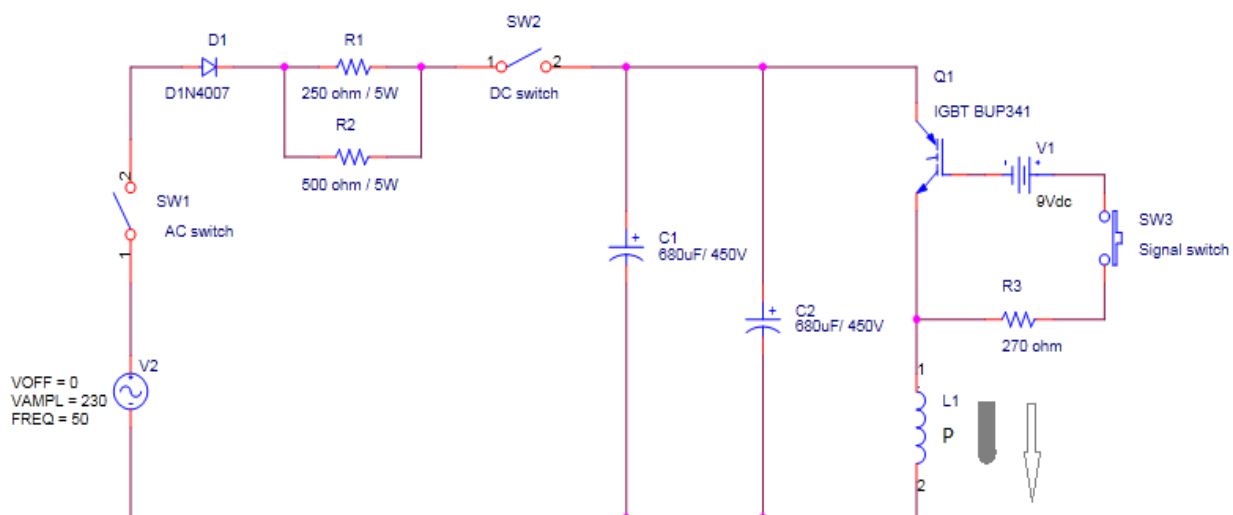
Podľa predpokladov by mali mať najväčšiu účinnosť náboje zo železa, pretože sú z magneticky mäkkej ocele a tá zosilní magnetickú indukciu, ktorá bude nimi prechádzať.

Pri meraní sa pokúsim nájsť optimálny materiál, dĺžku náboja a jeho optimálnu polohu.



*Obr.32 Projektily-ocelový,medený,hliníkový,mosadzný*

### 3.7 Schematický náčrt obvodu



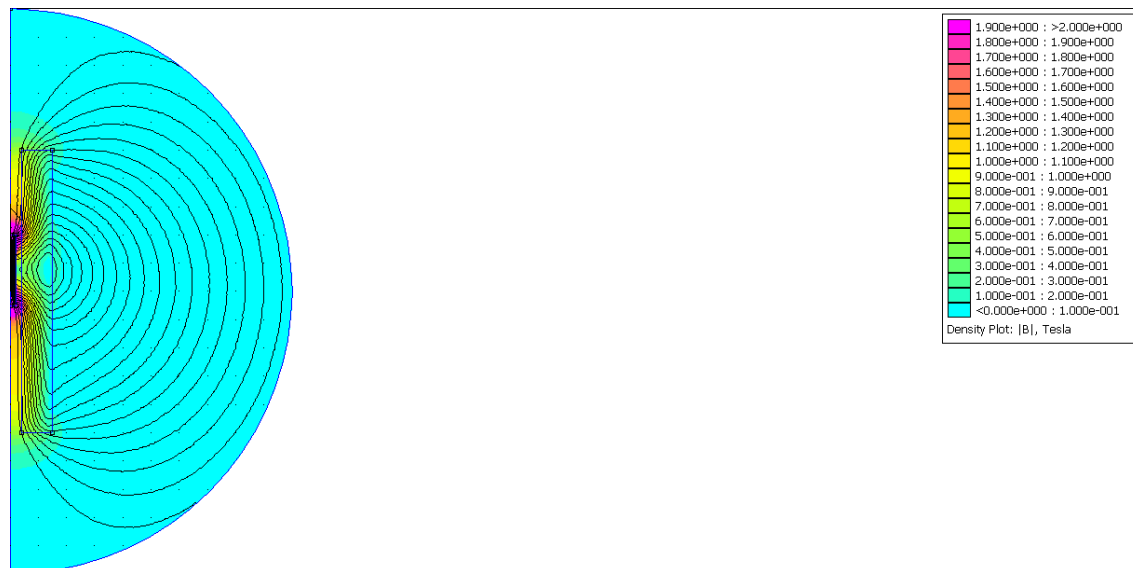
Obr.33 schéma obvodu

#### Zoznam súčiastok

- V1 – 9 V batéria
- C1,C2 – 680 mF kondenzátor
- D1 - usmerňovacia dióda
- L1 - navinutá cievka
- P – projektil
- R1 – odpor 250 ohm
- R2 – odpor 500 ohm
- R3 – odpor 270 ohm
- Q1 – IGBT tranzistor
- SW1 – vypínač siete
- SW2 – vypínač kondenzátory
- SW3 – tlačítko
- V2 – napájanie zo siete 230 V

### 3.8 POČÍTAČOVÁ SIMULÁCIA

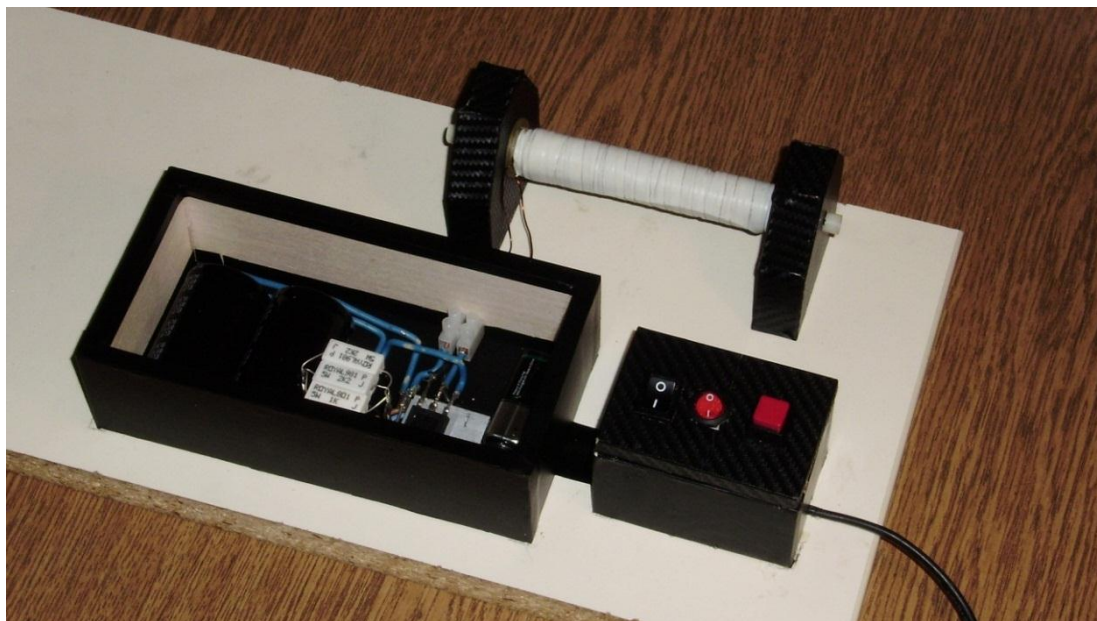
Rozloženie magnetického poľa pri prelete projektilu cez cievku som zobrazil v programe FEMM.



Obr.33 zobrazenie magnetického poľa v okolí projektilu pri prelete cievkou

Ako je vidno zo simulácie maximálne hodnoty magnetickej indukčnosti sa nachádzajú na koncoch projektilu.

### 3.9 Výsledná konštrukcia po zhotovení



Obr.34 Hotový coil gun

### 3.10 VÝSLEDKY MERANÍ

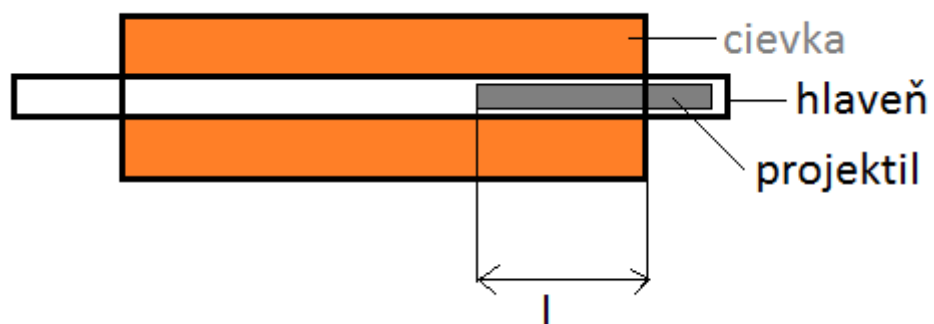
#### 3.10.1 Východisková pozícia

Prvým z rady meraní bolo meranie zamerané na experimentálne stanovenie ideálnej východiskovej pozície pre projektíl .

Poloha náboja je veľmi citlivá na výslednú rýchlosť. Stačí odchylka niekoľko malo milimetrov a projektíl nezíska maximálnu rýchlosť. Použil som niekoľko druhov projektílov –železný, medený, hliníkový a mosadzný. Tento graf spolu s tabuľkou ukazujú závislosť uloženia projektílu do hlavne a na jeho rýchlosti.

Optimálna východisková pozícia podľa meraní vyšla cca 4cm. To znamená, že náboj bol zastrčený 4cm(vzdialenosť  $l$ ) do vútra cievky. Najväčšiu rýchlosť dosiahol železný projektíl a za ním nasledoval medený.



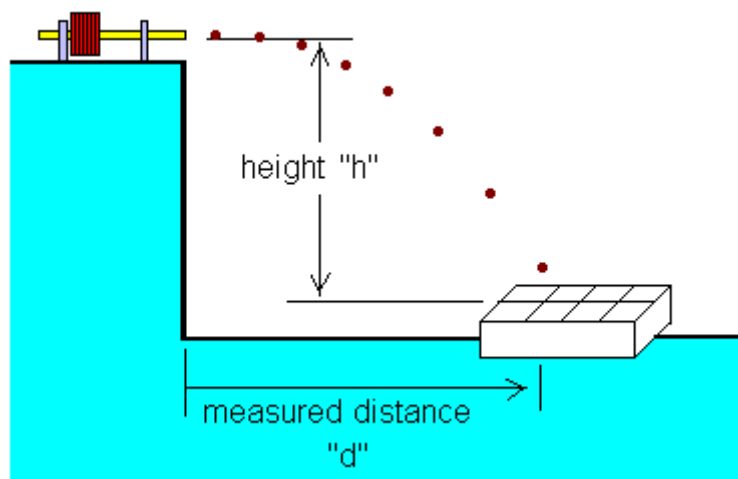


Obr.35 Pozícia náboja v cievke

Rýchlosť projektilu som počítal pomocou vzorca,

$$v = d \cdot \sqrt{(g / 2h)}$$

pričom  $d$  je vzdialenosť, ktorú strela preletí,  $h$  je pokles a  $g$  je gravitačná konštanta.



Obr. 35:Spôsob výpočtu rýchlosti[5]

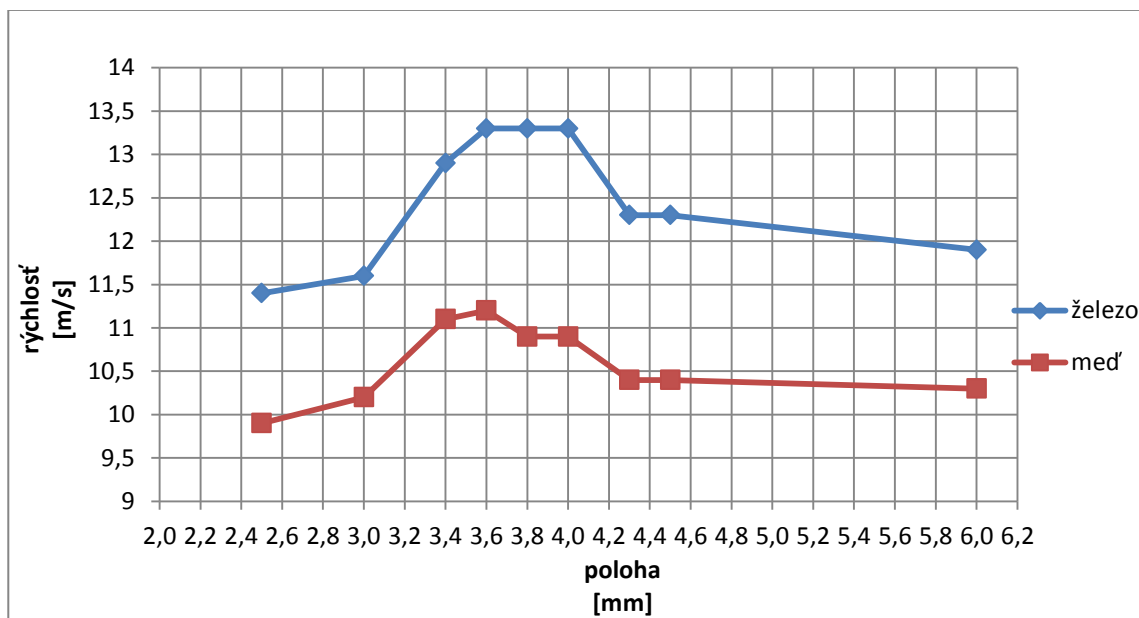
Výsledná kinetická energia sa počíta zo vzorca ,

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

kde  $v$  je rýchlosť a  $m$  hmotnosť.

Tab.1.: Prehľad rýchlostí železného a medeného projektilu v závislosti na polohe v cievke

optimálna poloha [mm]	rýchlosť železo [m/s]	rýchlosť meď [m/s]
2,5	11,4	9,9
3,0	11,6	10,2
3,4	12,9	11,1
3,6	13,3	11,2
3,8	13,3	10,9
4,0	13,3	10,9
4,3	12,3	10,4
4,5	12,3	10,4
6,0	11,9	10,3



Graf 1.: Závislosť rýchlosti železného a medeného projektilu na polohe v cievke.

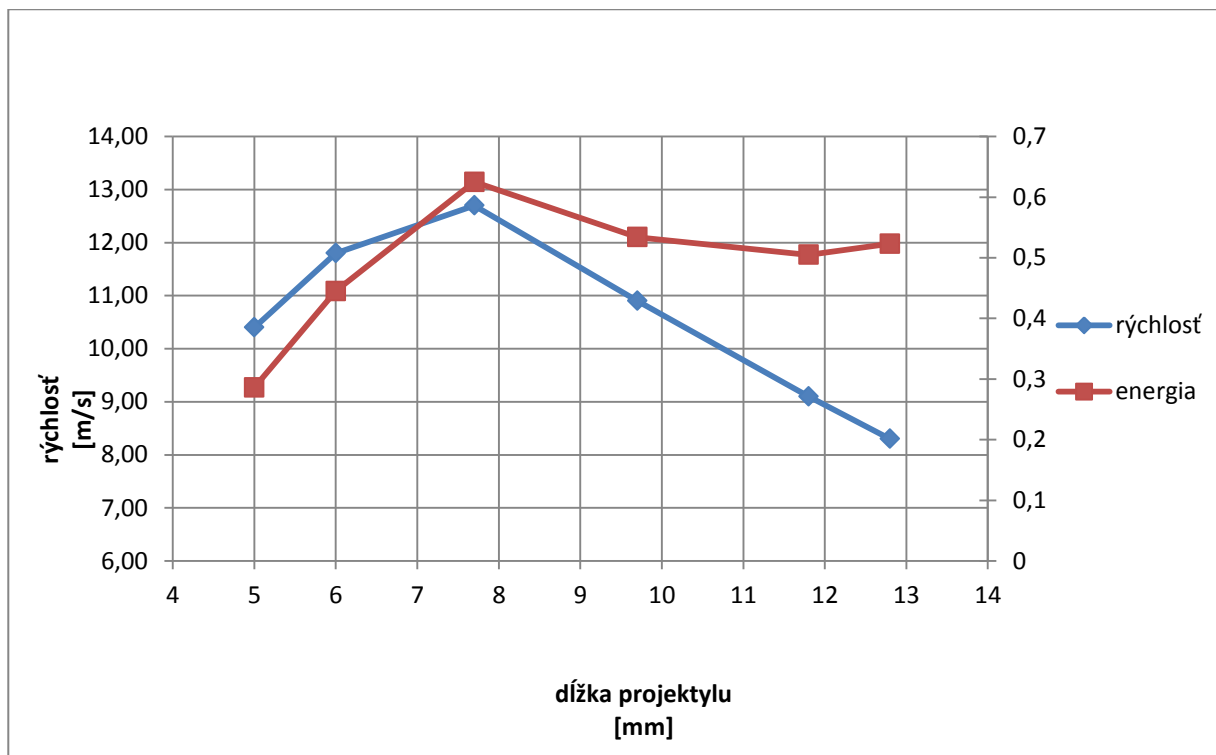
### 3.10.2 Optimálna dĺžka projektilu

Pri tomto meraní som zmeral rýchlosť a kinetickú energiu šiestich rôzne dlhých projektilov z ocele. Použil som najvýhodnejšiu východiskovú pozíciu 4cm zistenú z predchádzajúceho merania.

Ako je vidno z grafu a tabuľky najväčšiu rýchlosť a energiu dosahuje náboj dĺžky 7,7cm a hmotnosti 7,7g.

Tab.2.: Prehľad kinetickej energie a rýchlosti nábojov rôznych rozmerov.

dĺžka [mm]	hmotnosť[g]	rýchlosť [m/s]	kinetická energia [J]
12,8	15,2	8,30	0,523
11,8	12,2	9,10	0,505
9,7	9,0	10,9	0,534
7,7	7,7	12,7	0,625
6,0	6,4	11,8	0,445
5,0	5,2	10,4	0,286



Graf 2.: Závislosť dĺžky projektilu na rýchlosti a energii.

### 3.10.3 Materiál hlavne

Materiál, z ktorého sa hlavneň skladá je dôležitý pretože sa v ňom môžu indukovať vírivé prúdy. Podľa teórie by nám mohli pomôcť zvýšiť účinnosť. Na výber som mal materiál pvc a mosadz[5].

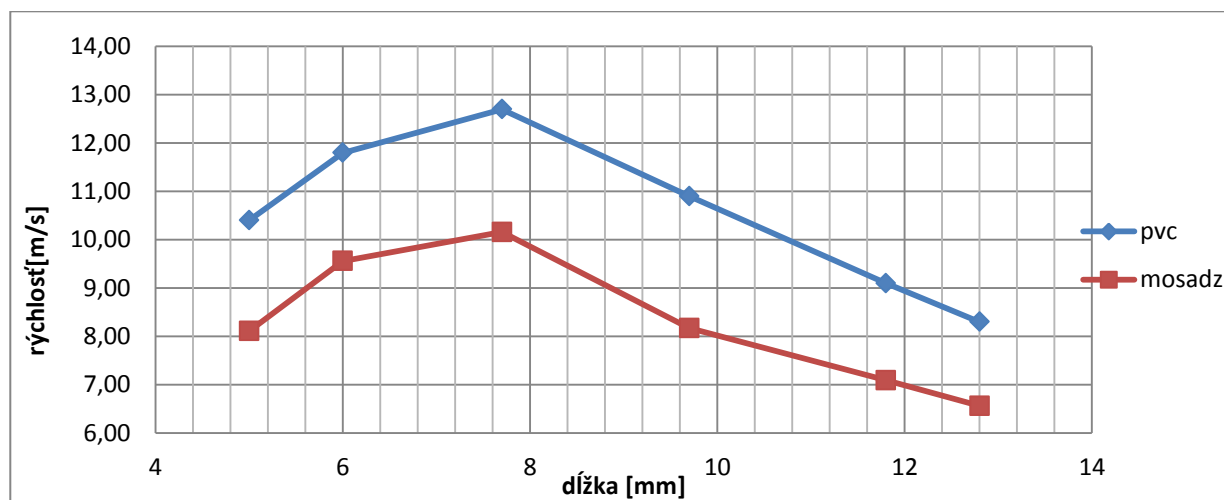
Teória sa však nepotvrdila a najväčšie rýchlosti som dosiahol pri použití hlavne z pvc.

Pre porovnanie strela vystrelená z mosadznej hlavne mala rýchlosť len 10,16m/s pričom projektíl vystrelený z PVC hlavne o rovnakých rozmeroch dosahoval rýchlosť až 12,7m/s.

Rozdiel v rýchlosti dosiahol až 20% čo je najviac s pomedzi všetkých meraní. Zníženie účinnosti bolo spôsobené rušením indukcie vírivých prúdov v projektele mosadzou.

Tab.3.: Prehľad rýchlosti projektilov rôznych rozmerov vystrelených z pvc a mosadznej hlavne.

dĺžka [mm]	rýchlosť pvc hlavneň [m/s]	rýchlosť mosadzná hlavne [m/s]
12,8	8,30	6,56
11,8	9,10	7,09
9,7	10,9	8,17
7,7	12,7	10,16
6,0	11,8	9,56
5,0	10,4	8,11



Graf 3.: Závislosť rýchlosti projektilu na materiály hlavne.

## 4 ZÁVER

V tejto práci som objasnil teóriu elektromagnetizmu a jeho vplyvu na veľmi malé telesá. Opísali sme niekoľko fyzikálnych javov, ktoré spadajú do tejto kapitoly. Ďalej sme opísali funkciu už zrealizovaného coil gunu, podrobne rozobrali jeho návrh a následnú konštrukciu.

Po tom čo som sa zoznámil s teóriou tejto problematiky, som sa v druhej časti zaoberal realizáciou návrhu a konštrukcie vlastného coil gunu. Návrh som optimalizoval pomocou dostupných simulátorov chovania jednoduchých objektov v magnetickom poli, pre maximalizovanie dosiahnutých výsledkov.

Po skonštruovaní návrhu som urobil niekoľko meraní za účelom zistenia optimálnych parametrov náboja a materiálu hlavne. Namerané hodnoty a výsledky sú zapísané v tabuľkách a vynesené do grafov. Zistil som, že optimálnym materiálom projektilu je oceľ, jeho rozmery sú 7,7 cm a najvhodnejšia pre strieľanie je hlaveň vyrobená z pvc.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] HANIC, Michal. Elektromagnetické pulzné zariadenie Coil gun [online]. Bratislava, 2010 [cit. 2011-12-22].  
Dostupné z:  
[http://www.nuc.elf.stuba.sk/svoc10/cd/PRISPEVKY/15RE/SVOC\\_RE2010\\_Hanic\\_Vanco.pdf](http://www.nuc.elf.stuba.sk/svoc10/cd/PRISPEVKY/15RE/SVOC_RE2010_Hanic_Vanco.pdf).  
Študentská vedecká a odborná činnosť. STU Bratislava.
- [2] DOC. ING. KAREL DRAXLER, CSC., DOC. ING. PETR KACPAR, CSC. a PROF. ING. PAVEL RIPKA, CSC.  
Magneticke prvky a mereni. Praha, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0. Skriptum. CVUT Praha.
- [3] WIKIPEDIA. Indukcnost. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Indukcnost>
- [4] JAMES PAUL. Coilgun Systems [online]. 2001-2006 [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/index.html>
- [5] Barry's Coilgun Design Site. HANSEN, Barry. *Coilgun.info* [online]. 1998-2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.coilgun.info/about/home.htm>
- [6] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. *Elektromagnetické aktuátory*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 8073002167

## ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

$B$	magnetická indukcia
$\mu_0$	permeabilita vákua
$I$	intenzita magnetického poľa
$U_i$	indukované napätie
$W$	energia magnetického poľa
$U_{\max}$	maximálne napätie
$I_{\text{peak}}, I_p$	špičkové napätie
$L$	indukčnosť cievky
$C$	kapacita kondenzátora
$C_g$	kapacita hradla
$R$	odpor
ESR	vnútorný odpor kondenzátora
$U_c$	usmernené napätie
$t$	čas
$R_i$	odpor cievky
$v$	rýchlosť
$g$	gravitačná konštanta
$h$	výška
$E_k$	kinetická energia
$m$	hmotnosť

